

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240929002

引用格式: 王晓玲, 陈婷茹, 刘智禹, 等. 嫩芽海带加工中不同工序对营养成分及矿物质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(2): 119–126.

WANG XL, CHEN TR, LIU ZY, *et al.* Effects of different processes on nutritional compositions and minerals in the processing of tender *Laminaria japonica* [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(2): 119–126. (in Chinese with English abstract).

嫩芽海带加工中不同工序对营养成分及矿物质的影响

王晓玲^{1,2}, 陈婷茹¹, 刘智禹¹, 李颖³, 陈晓婷¹, 范霖澳³,
叶毅峰³, 王茵^{1*}, 熊何健^{2*}

(1. 福建省水产研究所, 福建省海洋生物增殖与高值化利用重点实验室, 厦门 361013;
2. 集美大学海洋食品与生物工程学院, 厦门 361021; 3. 福建农林大学食品科学学院, 福州 350002)

摘要: **目的** 探究嫩芽海带加工过程中不同工序对营养成分及矿物质的影响。**方法** 本研究探究了嫩芽海带在加工过程中热烫和盐渍工序对其主要营养成分和矿物质的影响。**结果** 新鲜嫩芽海带的水分、粗蛋白质、膳食纤维、粗脂肪、褐藻胶、甘露醇、碘、氨基酸、锰、磷、铁和钾含量最高, 其次为热烫后的嫩芽海带, 盐渍嫩芽海带最低, 这可能是由于热烫高温和盐渍脱水加工过程使嫩芽海带中营养成分出现不同程度的损失。氨基酸组成分析表明, 新鲜嫩芽海带更符合联合国粮食及农业组织/世界卫生组织(Food and Agricultural Organization of the United Nations/World Health Organization, FAO/WHO)推荐的理想蛋白质模式。重金属含量分析表明嫩芽海带重金属元素含量均符合国内外食品安全标准规定。主成分分析结果表明, 新鲜嫩芽海带的综合得分最高, 品质最佳, 经过热烫和盐渍后新鲜嫩芽海带的综合营养品质有所下降。**结论** 嫩芽海带在加工过程中经热烫和盐渍后, 营养成分和矿物质均出现不同程度的损失, 本研究可为嫩芽海带今后的高值化开发利用和可持续发展提供科学依据。

关键词: 嫩芽海带; 加工; 营养成分; 矿物质; 主成分分析

Effects of different processes on nutritional compositions and minerals in the processing of tender *Laminaria japonica*

WANG Xiao-Ling^{1,2}, CHEN Ting-Ru¹, LIU Zhi-Yu¹, LI Ying³, CHEN Xiao-Ting¹,
FAN Lin-Ao³, YE Yi-Feng³, WANG Yin^{1*}, XIONG He-Jian^{2*}

(1. Key Laboratory of Cultivation and High-value Utilization of Marine Organisms in Fujian Province, Fisheries Research Institute of Fujian, Xiamen 361013, China; 2. College of Marine Food and Bioengineering, Jimei University, Xiamen 361021, China; 3. College of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

收稿日期: 2024-09-29

基金项目: 福建省海洋与渔业结构调整专项(2021HYJG15); 福建省省属公益类科研院所基本科研专项(2023R1012002); 福建省海洋服务与渔业高质量发展专项(FJHY-YYKJ-2024-1-17, FJHY-YYKJ-2023-1-2); 厦门市海洋与渔业发展专项青年科技创新项目(23YYST0770CA05)

第一作者: 王晓玲(1995—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水产品加工。E-mail: 729282836@qq.com

*通信作者: 王茵(1983—), 女, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为水产品加工与综合利用。E-mail: wangyin_83@163.com
熊何健(1968—), 男, 硕士, 研究员, 主要研究方向为食品化学与营养。E-mail: hjxiong@jmu.edu.cn

ABSTRACT: Objective To investigate the effects of different processes on nutritional compositions and minerals in the processing of tender *Laminaria japonica*. **Methods** In this paper, the effects of blanching and salting processes on the main nutritional compositions and minerals of tender *Laminaria japonica* during processing were studied. **Results** The content of water, crude protein, dietary fiber, crude fat, alginate, mannitol, iodine, amino acids, manganese, phosphorus, iron, and potassium in fresh tender *Laminaria japonica* were the highest, followed by blanched tender *Laminaria japonica*, and the lowest was salted tender *Laminaria japonica*, which might be due to the high temperature of blanching and the dehydration process of salting, resulting in varying degrees of loss of nutrients in tender *Laminaria japonica*. Amino acid composition analysis showed that fresh tender *Laminaria japonica* was more in line with the ideal protein pattern recommended by Food and Agricultural Organization of the United Nations/World Health Organization (FAO/WHO). Heavy metal content analysis showed that the content of heavy metal elements in tender *Laminaria japonica* met the food safety standards at home and abroad. The results of principal component analysis showed that the comprehensive scores of fresh tender *Laminaria japonica* was the highest and the quality was the best. After blanching and salting, the comprehensive nutritional quality of fresh tender *Laminaria japonica* decreased. **Conclusion** During the processing of tender *Laminaria japonica*, nutritional compositions and minerals are lost to varying degrees after blanching and salting. This study can provide a scientific basis for the high-value development, utilization, and sustainable development of tender *Laminaria japonica* in the future.

KEY WORDS: tender *Laminaria japonica*; processing; nutritional compositions; minerals; principal component analysis

0 引言

海带(*Laminaria japonica*), 是褐藻门(Phaeophyta)褐藻纲(Phaeophyceae)海带目(Laminariales)海带科(Laminaceae)海带属(*Laminaria*)的一种个体大、生长快、经济价值高的褐藻。海带富含多种营养成分, 具有预防和治疗甲状腺肿大、防治富贵病、降三高和抗癌等作用^[1-4], 被称为“第七营养素”“长寿保健食品”和“天然微量元素宝库”^[5]。嫩芽海带是幼嫩期海带, 新鲜藻体长 30~60 cm, 呈黄褐色。相较于成熟海带, 嫩芽海带口感更为细嫩, 味道更为鲜美, 在烹饪方面, 更可以呈现出海洋蔬菜本身的特性。

福建省是我国重要的海带养殖地区, 海带养殖产量位居全国首位, 根据《2023 年中国渔业统计年鉴》数据显示, 2022 年我国海带养殖面积 4.56 万公顷、产量 143.06 万 t, 其中福建海带养殖面积 2.20 万公顷、产量 86.13 万 t^[6]。近年来嫩芽海带细嫩口感受到消费者的青睐, 市场需求旺盛, 福建省嫩芽海带产量持续增加, 仅福建省霞浦县的嫩芽海带产量就已超过 5000 t, 预计嫩芽海带市场空间可达 10 万 t 以上, 未来嫩芽海带可望成为带动海带产业新一轮发展的重要动力。

嫩芽海带在市场上大多以传统盐渍的加工方法为主, 嫩芽海带经盐渍后不易受外界环境变化的干扰, 能保持较高的水分和较好的形态色泽, 利于长途运输和长期贮藏^[7-8]。由于嫩芽海带用于食用仅近几年才兴起, 相应的精深加工和开发利用方面的研究还未深入开展, 对于嫩芽海带在加工

过程中的营养成分和价值变化尚未有较系统的分析及评价。本研究以嫩芽海带为研究对象, 探究其在盐渍加工中不同工序对主要营养成分、氨基酸和矿物质元素等的影响, 并运用主成分分析法评价不同加工工序处理后嫩芽海带的综合营养品质, 旨在深入掌握其食用及营养价值, 为嫩芽海带的高值化开发利用和可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

嫩芽海带(福建省宁德市霞浦县嫩芽海带的养殖区)。

氢氧化钠、硫酸、硼酸、盐酸等试剂(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司)。

1.2 仪器与设备

KSJ 型电炉温度控制器(山东神龙口市先科仪器公司); DHG-9141A 型电热恒温鼓风干燥箱(上海浦东荣丰科学仪器有限公司); HH-6 型数显恒温水浴锅(国华电器有限公司); BSA224S 型电子分析天平(感量 0.0001 g, 厦门精艺兴业科技有限公司); HYP-1008 型八孔消化炉、KDN-103F 型自动凯氏定氮仪(上海纤检仪器有限公司); L8800 型氨基酸自动分析仪(日本日立公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 嫩芽海带盐渍加工工艺

嫩芽海带盐渍加工工艺如图 1 所示, 具体操作步骤如下:

采摘: 嫩芽海带帘下海拆帘养殖 40 d, 长至藻体长约 30~60 cm, 宽约 3~7 cm。

清洗: 嫩芽海带海上采收时, 应先在海水里荡洗, 除去泥沙和杂质。

筛选: 应挑选新鲜、藻体完整的嫩芽海带进行加工, 剔除烂苗、病苗和藻体不完整的嫩芽海带。

热烫: 在 90 °C 的洁净海水中烫漂约 30 s, 嫩芽海带由棕褐色变为翠绿色。

冷却: 在洁净冷水中冷却至室温。

沥干: 沥干去掉表面多余的水分。

拌盐: 将沥干后的嫩芽海带输送至滚桶中, 加入原料嫩芽海带重约 35% 的食用盐, 充分滚动搅拌均匀。

盐渍: 将均匀混合食用盐的嫩芽海带, 层叠铺在可渗水的腌渍袋里, 并在上方压以重物腌渍 24 h, 至渗出的卤水盐浓度为 20 波美度。

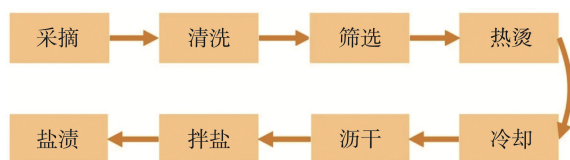


图1 嫩芽海带盐渍加工工艺

Fig.1 Salted processing technology of tender *Laminaria japonica*

1.3.2 样品采集

分别取不同加工工序处理后的嫩芽海带进行营养成分和矿物质的测定。新鲜嫩芽海带: 经采摘、清洗和筛选后的嫩芽海带。热烫后的嫩芽海带: 新鲜嫩芽海带经热烫、冷却和沥干后的嫩芽海带。盐渍嫩芽海带: 热烫后的嫩芽海带经拌盐和盐渍后的嫩芽海带。

1.3.3 基本营养成分测定

水分参照 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》中的直接干燥法进行测定; 粗蛋白质参照 GB 5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》中的“第一法 凯氏定氮法”进行测定; 粗脂肪参照 GB 5009.6—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》中的“第一法 索氏抽提法”进行测定; 灰分参照 GB 5009.4—2016《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》中的“第一法 食品中总灰分的测定”进行测定; 总糖参照 GB 5009.8—2016《食品安全国家标准 食品中果糖、葡萄糖、蔗糖、麦芽糖、乳糖的测定》中的“第二法 酸水解-莱因-埃氏法”进行测定; 粗纤维参照 GB 5009.88—2014《食品安全国家标准 食品中膳食纤维的测定》中的“酶重量法”进行测定。

1.3.4 褐藻酸盐、甘露醇和碘测定

褐藻酸盐和甘露醇参照 SC/T 3405—2018《海藻中褐藻酸盐、甘露醇含量的测定》进行测定; 碘含量参照 GB 5009.267—2020《食品安全国家标准 食品中碘的测定》中

的“第一法 电感耦合等离子体质谱法”进行测定。

1.3.5 氨基酸组成及含量测定

参照 GB 5009.124—2016《食品安全国家标准 食品中氨基酸的测定》的方法, 通过自动氨基酸分析仪测定嫩芽海带样品中的氨基酸成分。

1.3.6 矿物质成分测定

磷(P)参照 GB/T 5009.87—2016《食品安全国家标准 食品中磷的测定》测定; 铁(Fe)参照 GB 5009.90—2016《食品安全国家标准 食品中铁的测定》测定; 钙(Ca)参照 GB 5009.92—2016《食品安全国家标准 食品中钙的测定》测定; 钾(K)和钠(Na)参照 GB 5009.91—2017《食品安全国家标准 食品中钾、钠的测定》测定; 镁(Mg)参照 GB 5009.241—2017《食品安全国家标准 食品中镁的测定》测定; 锰(Mn)参照 5009.242—2017《食品安全国家标准 食品中锰的测定》测定。

1.3.7 重金属含量测定

铅(Pb)参照 GB/T 5009.12—2017《食品安全国家标准 食品中铅的测定》中的“第二法 电感耦合等离子体质谱法”进行测定; 无机砷参照 GB 5009.11—2014《食品安全国家标准 食品中总砷及无机砷的测定》第二篇中的“第一法 液相色谱-原子荧光光谱法”进行测定; 镉(Cd)参照 GB 5009.15—2014《食品安全国家标准 食品中镉的测定》进行测定; 总汞参照 GB 5009.17—2021《食品安全国家标准 食品中总汞及有机汞的测定》第一篇中的“第一法 原子荧光光谱法”进行测定。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2021 进行数据处理, 数据以平均值±标准偏差表示, 实验重复次数为 3 次, 采用 SPSS Statistics 21.0 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 基本营养成分含量分析

新鲜嫩芽海带、热烫后的嫩芽海带和盐渍嫩芽海带的水分含量分别为 92.66%、91.76%和 65.69%, 其中新鲜嫩芽海带的水分含量最高。由表 1 可知, 不同加工工序处理后的嫩芽海带的基本营养成分含量存在差异。新鲜嫩芽海带的粗蛋白质、膳食纤维和灰分含量均高于热烫后的嫩芽海带, 一方面原因可能是由于热烫过程中高温使海带的蛋白质变性和分解以及破坏部分膳食纤维结构^[9-10], 另一方面可能是由于水溶性蛋白质和可溶性膳食纤维在热烫过程中溶于水, 从而使蛋白质和膳食纤维含量降低^[11], 且高温处理会导致部分矿物质流失从而导致灰分含量减少。盐渍嫩芽海带的粗蛋白质、粗脂肪和膳食纤维含量均低于新鲜嫩芽海带和热烫后的嫩芽海带, 这可能是由于盐渍脱水过程采用的加压重物方式造成海带细胞破裂, 部分营养成分

会因渗透压的差异而流失到盐水中^[12], 而盐渍海带的灰分含量较高可能是由于其表面含有较多的氯化钠等无机盐从而增加了灰分含量。

表 1 嫩芽海带在加工过程中基本营养成分含量变化 (g/100 g, 干重, n=3)

基本营养成分	新鲜嫩芽海带	热烫后的嫩芽海带	盐渍嫩芽海带
粗蛋白质	16.52±0.07 ^a	14.43±0.16 ^b	9.75±0.10 ^c
粗脂肪	0.73±0.06 ^a	0.65±0.06 ^a	0.20±0.02 ^b
膳食纤维	28.23±0.24 ^a	24.41±0.08 ^b	19.14±0.03 ^c
灰分	14.25±0.06 ^a	12.10±0.05 ^b	37.83±0.11 ^c

注: 同一行中标有不同小写字母表示差异显著($P<0.05$), 下同。

2.2 褐藻胶、甘露醇、碘含量分析

褐藻胶主要是从褐藻中提取的一类多糖物质, 褐藻胶可应用在食品、医药、农业和印染工业等领域, 可用于生产止血剂或食品稳定剂等, 其海带中含量丰富, 一般为 19.17%^[13-14]。如表 2 所示, 以干基计, 不同加工工序处理后的嫩芽海带的褐藻胶含量为 11.21~21.96 g/100 g, 经热烫和盐渍后褐藻胶含量显著下降($P<0.05$), 这可能是由于褐藻胶是一种来源于褐藻细胞壁的水溶性酸性多糖^[13], 因此在加工过程中会溶于水而造成损失。甘露醇是一种白色或无色的粉末状结晶, 具有清凉甘甜味, 海带表面的白色粉末就是天然的甘露醇^[15-16], 不同加工工序处理后的嫩芽海带的甘露醇含量为 1.42~3.84 g/100 g, 与加工处理对嫩芽海带中褐藻胶含量的影响相类似, 经热烫和盐渍后甘露醇含量也显著下降($P<0.05$), 这可能是由于甘露醇易溶于水^[17], 因此在加工过程中也容易损失。碘是人体维持健康状态所必需的微量元素之一, 新鲜嫩芽海带经盐渍后碘含量降为 0.01 g/100 g, 碘含量损失 93.75%, 这与王雨馨等^[12]的研究结果一致。成年人每天食用 0.6 g 热烫后嫩芽海带(干重)或 1.2 g 盐渍嫩芽海带(干重)就可以达到中国及世界卫生组织(World Health Organization, WHO)膳食碘的推荐摄入量(recommended nutrient intakes, RNI) (120 μg/d)^[18]。

表 2 嫩芽海带在加工过程中褐藻胶、甘露醇和碘含量变化 (g/100 g, 干重, n=3)

Table 2 Changes of sodium alginate, mannitol and iodine in tender *Laminaria japonica* during processing (g/100 g, dry basis, n=3)

成分	新鲜嫩芽海带	热烫后的嫩芽海带	盐渍嫩芽海带
褐藻胶	21.96±0.07 ^a	19.14±0.04 ^b	11.21±0.01 ^c
甘露醇	3.84±0.02 ^a	2.27±0.01 ^b	1.42±0.01 ^c
碘	0.16±0.00 ^a	0.02±0.00 ^b	0.01±0.00 ^c

2.3 氨基酸组成分析

本研究对新鲜嫩芽海带、热烫后的嫩芽海带和盐渍嫩芽海带的氨基酸组成进行了分析。由表 3 可知, 不同加工工序处理后的嫩芽海带均检出 18 种氨基酸, 氨基酸种类且含量丰富, 谷氨酸和天冬氨酸含量最高。TAA 含量为 8.29%~15.87%, EAA 含量为 3.29%~6.46%。嫩芽海带中的氨基酸含量均在加工过程中逐渐损失, 这可能是由于热烫和盐渍处理导致蛋白质减少, 从而使氨基酸含量减少。参考 FAO/WHO 关于人体摄入必需氨基酸的推荐标准, 新鲜嫩芽海带和热烫后的嫩芽海带中的苏氨酸、缬氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、苯基丙氨酸和赖氨酸均超过 FAO/WHO 标准, 只有蛋氨酸低于 FAO/WHO 标准。盐渍嫩芽海带的苏氨酸、缬氨酸、亮氨酸、苯基丙氨酸和赖氨酸均超过 FAO/WHO 标准, 只有异亮氨酸和蛋氨酸低于 FAO/WHO 标准。根据 FAO/WHO 推荐的理想蛋白质模式^[19]认为: 蛋白质氨基酸组成 EAA/TAA 在 40%左右, EAA/NEAA 比值在 60%以上时蛋白质的质量较好。新鲜嫩芽海带的 EAA/TAA 和 EAA/NEAA 分别为 40.71%和 68.65%, 与倪辉等^[20]研究结果较为接近, 热烫后嫩芽海带的 EAA/TAA 和 EAA/NEAA 分别为 39.49%和 65.26%, 盐渍嫩芽海带的 EAA/TAA 和 EAA/NEAA 分别为 39.69%和 65.80%, 说明新鲜嫩芽海带的氨基酸含量营养丰富、均衡, 更符合该理想模式。不同加工工序处理后的嫩芽海带的 FAA 可占 TAA 的 37%左右, 说明经不同加工工序处理后的嫩芽海带均有较浓的海鲜味, 是一种优质的天然调味剂。

表 3 嫩芽海带在加工过程中氨基酸含量变化(% , 干重, n=3)

Table 3 Changes of amino acids in tender *Laminaria japonica* during processing(% , dry basis, n=3)

氨基酸种类	新鲜嫩芽海带	热烫后的嫩芽海带	盐渍嫩芽海带	FAO/WHO 标准
苏氨酸*	0.91±0.01 ^a	0.71±0.00 ^b	0.49±0.01 ^c	0.28
缬氨酸*	1.08±0.02 ^a	0.76±0.02 ^b	0.56±0.01 ^c	0.42
蛋氨酸*	0.17±0.02 ^a	0.13±0.01 ^a	0.07±0.01 ^b	0.22
异亮氨酸*	0.82±0.02 ^a	0.55±0.01 ^b	0.41±0.01 ^c	0.42
亮氨酸*	1.44±0.03 ^a	0.98±0.01 ^b	0.74±0.01 ^c	0.48
苯基丙氨酸*	0.89±0.02 ^a	0.60±0.01 ^b	0.46±0.01 ^c	0.28
赖氨酸*	0.98±0.01 ^a	0.65±0.01 ^b	0.52±0.01 ^c	0.42

表 3(续)

氨基酸种类	新鲜嫩芽海带	热烫后的嫩芽海带	盐渍嫩芽海带	FAO/WHO 标准
色氨酸*	0.17±0.01 ^a	0.08±0.00 ^b	0.04±0.00 ^c	-
天冬氨酸#	1.74±0.03 ^a	1.29±0.01 ^b	0.93±0.01 ^c	-
丝氨酸	0.79±0.00 ^a	0.61±0.00 ^b	0.43±0.01 ^c	-
谷氨酸#	1.89±0.03 ^a	1.35±0.01 ^b	1.00±0.01 ^c	-
甘氨酸#	1.01±0.02 ^a	0.73±0.01 ^b	0.53±0.01 ^c	-
丙氨酸#	1.25±0.02 ^a	0.92±0.01 ^b	0.65±0.01 ^c	-
酪氨酸	0.55±0.01 ^a	0.39±0.00 ^b	0.28±0.00 ^c	-
组氨酸	0.33±0.01 ^a	0.20±0.00 ^b	0.17±0.00 ^c	-
精氨酸	0.95±0.02 ^a	0.67±0.01 ^b	0.50±0.01 ^c	-
脯氨酸	0.70±0.01 ^a	0.51±0.00 ^b	0.39±0.01 ^c	-
胱氨酸	0.20±0.00 ^a	0.18±0.00 ^b	0.12±0.00 ^c	-
EAA	6.46	4.47	3.29	-
NEAA	9.41	6.85	5.00	-
TAA	15.87	11.32	8.29	-
FAA	5.89	4.29	3.11	-
EAA/TAA	40.71	39.49	39.69	-
EAA/NEAA	68.65	65.26	65.80	-
FAA/TAA	37.11	37.90	37.52	-

注: *代表必需氨基酸; #代表鲜味氨基酸; 联合国粮食及农业组织(Food and Agricultural Organization of the United Nations, FAO); 必需氨基酸(essential amino acid, EAA); 非必需氨基酸(non-essential amino acid, NEAA); 氨基酸总含量(total amino acid, TAA); 鲜味氨基酸(flavor amino acid, FAA); -表示无此项。

2.4 矿物质元素含量分析

矿物质元素是人体中重要的营养成分, 相关研究表明海带是一种矿物质元素种类及含量丰富的海洋食品^[21-22]。由表 4 可知, 嫩芽海带含量最高的常量元素是 K 和 Na, 盐渍嫩芽海带中 Na 元素含量远高于新鲜和热烫后的嫩芽海带, 这是因为嫩芽海带在盐渍过程中所用食盐的主要成分是氯化钠, 使海带中的 Na 元素含量骤增。人体中的 Na 元素可控制细胞内液, 有利于维持机体的水分, 促进人体的酸碱平衡, K 元素可控制细胞外液。Na 元素含量过高会使 Na/K 升高, 从而导致血压升高, 造成高血压等一系列疾病^[23], RUPEREZ^[24]指出褐藻 Na/K 低于 1.5 是较为理想的比值, 不易引起高血压, 盐渍嫩芽海带 Na/K 值远大于 1.5, 因此高血压患者应适量食用盐渍嫩芽海带。Ca 是人体牙齿和骨骼的重要组成成分^[25], Mg 是一种增强记忆力的元素, 具有镇静、保护心脏的作用, Mg 和 P 能够促进人体对 Ca 的吸收利用, 其保持一定比例能够维持肌肉和神经的正常反应^[26]。食物中 Ca、P 比非常重要, 一般认为, 对于需要高 Ca 膳食供应的人, Ca/P 应在 1:1 到 2:1 之间, 如果 Ca/P 不协调, 就会引起生理障碍^[27], 可见新鲜嫩芽海带中所含 Ca、P 比例合适, 可作为良好的补 Ca 食品。嫩芽海带中最高量的微量元素是 Fe, Fe 是血红蛋白形成的重要因素, 维持机体的造血

功能, 减少贫血的作用^[28]。Mn 的含量虽然很低, 但 Mn 是软骨生成中不可缺少的辅助因子, 缺 Mn 可影响 Ca 的吸收从而导致骨质疏松^[21]。嫩芽海带中的 K、P、Fe、Mn 含量均在加工过程中逐渐损失, 而 Ca 和 Mg 含量经过热烫加工后反而增加, 这可能是由于海带热烫过程中采用的热烫水为海水, 海水加热后 Ca 和 Mg 容易析出, 因此增加了嫩芽海带中的 Ca 和 Mg 含量^[29]。

表 4 嫩芽海带在加工过程中矿物质元素含量变化 (mg/kg, 干重, n=3)

Table 4 Changes of mineral elements in tender <i>Laminaria japonica</i> during processing (mg/kg, dry basis, n=3)			
矿物质元素	新鲜嫩芽海带	热烫后的嫩芽海带	盐渍嫩芽海带
Mg ($\times 10^3$)	6.08±0.03 ^b	14.44±0.17 ^a	4.75±0.02 ^c
Mn	31.83±0.22 ^a	19.13±0.35 ^b	4.88±0.14 ^c
Fe ($\times 10^3$)	1.06±0.02 ^a	0.68±0.03 ^b	0.06±0.00 ^c
P ($\times 10^3$)	7.60±0.11 ^a	2.71±0.06 ^b	1.01±0.04 ^c
Ca ($\times 10^3$)	7.60±0.12 ^b	11.27±0.14 ^a	3.25±0.06 ^c
Ca/P	1.0:1	4.2:1	3.2:1
K ($\times 10^3$)	179.89±1.57 ^a	22.32±0.33 ^b	9.24±0.15 ^c
Na ($\times 10^3$)	34.19±1.11 ^c	95.51±2.41 ^b	470.38±10.44 ^a
Na/K	0.19	4.28	50.91

2.5 重金属含量分析

海洋藻类植物等可经过主动运输和被动吸收等途径蓄积海洋中的重金属离子,因此对藻类体内的重金属含量进行分析和安全评价尤为重要。按照 GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》和 NY/T 1709—2021《绿色食品 藻类及其制品》中关于重金属的限量标准(Pb≤0.5 mg/kg、甲基汞≤0.5 mg/kg、无机砷≤0.5 mg/kg)以及欧盟 No 629/2008 关于重金属的限量要求(Cd≤3.0 mg/kg),由表 5 可知,嫩芽海带中总汞的含量均未检出,无机砷、Pb 和 Cd 的含量均在安全范围内。由此得出,嫩芽海带在盐渍加工过程中的重金属元素含量均符合国家安全标准规定,可以成为人们放心食用的安全食品。

表 5 嫩芽海带在加工过程中重金属元素含量变化(mg/kg, n=3)
Table 5 Changes of heavy metal elements in tender *Laminaria japonica* during processing (mg/kg, n=3)

重金属成分	新鲜嫩苗海带	热烫后的嫩芽海带	盐渍嫩芽海带
总汞	ND	ND	ND
无机砷	0.09±0.01	0.09±0.00	0.12±0.01
Cd	0.02±0.00	0.02±0.00	0.02±0.00
Pb	ND	0.07±0.00	0.15±0.00

注: ND 代表未检出。

2.6 主成分分析

主成分分析是对数据进行降维处理,将复杂的多个变量变成几个具有代表性的新的综合变量,并探究变量间的线性关系,目前主成分分析已广泛应用于果蔬等食品的质量评价领域中^[30]。将对嫩芽海带有利的 33 项营养成分和矿物质指标进行主成分分析,特征值代表各指标对主成分载荷的相对大小和作用方向^[31],根据特征值>1 的原则,提取前 2 个主成分,累计贡献率达 100%,可解释嫩芽海带品质的全部信息,结果见表 6 和表 7。第 1 主成分的特征值为 29.316,贡献率最高,为 88.836%,丝氨酸和苏氨酸占有较高载荷;第 2 主成分特征值为 3.684,贡献率为 11.164%,灰分、K 和碘占有较高载荷。

由权重系数和各指标标准化的数值可以得出 2 个主成分 F_1 和 F_2 得分模型以及建立 F 综合得分模型^[32],得分模型表达式分别见式(1)~(3):

表 6 嫩芽海带营养品质的主成分特征值和贡献率
Table 6 Principal component eigenvalues and contribution rates of the nutritional quality of tender *Laminaria japonica*

主成分	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%
1	29.316	88.836	88.836
2	3.684	11.164	100

表 7 嫩芽海带营养品质的主成分分析因子载荷矩阵

Table 7 Factor loading matrix of principal component analysis of the nutritional quality of tender *Laminaria japonica*

指标	主成分	
	1	2
丝氨酸	1.000	-0.003
苏氨酸	1.000	-0.031
Mn	0.999	-0.037
丙氨酸	0.999	0.054
天冬氨酸	0.998	0.061
甘氨酸	0.996	0.092
膳食纤维	0.995	-0.095
酪氨酸	0.995	0.103
谷氨酸	0.993	0.119
脯氨酸	0.992	0.126
缬氨酸	0.992	0.129
精氨酸	0.991	0.136
蛋氨酸	0.990	-0.140
Fe	0.990	-0.141
甘露醇	0.986	0.166
亮氨酸	0.985	0.175
异亮氨酸	0.984	0.177
苯丙基氨酸	0.981	0.194
粗蛋白质	0.976	-0.219
赖氨酸	0.971	0.240
P	0.964	0.266
色氨酸	0.964	0.266
褐藻胶	0.963	-0.268
胱氨酸	0.960	-0.281
组氨酸	0.942	0.336
粗脂肪	0.926	-0.377
Na	-0.922	0.387
碘	0.906	0.424
K	0.900	0.436
水分	0.879	-0.477
灰分	-0.824	0.567
Mg	0.123	-0.992
Ca	0.539	-0.842

$$F_1=0.180X_1+0.171X_2+0.184X_3-0.152X_4+0.178X_5+0.182X_6+0.1671X_7+0.185X_8+0.183X_9+0.183X_{10}+0.182X_{11}+0.182X_{12}+0.181X_{13}+0.179X_{14}+0.178X_{15}+0.184X_{16}+0.185X_{17}+0.183X_{18}+0.184X_{19}+0.185X_{20}+0.184X_{21}+0.174X_{22}+0.183X_{23}+0.183X_{24}+0.177X_{25}+0.023X_{26}+0.185X_{27}+0.178X_{28}+0.183X_{29}+0.100X_{30}+0.166X_{31}-0.170X_{32}+0.162X_{33} \quad (1)$$

$$F_2=-0.114X_1-0.196X_2-0.049X_3+0.295X_4-0.140X_5+0.086X_6+0.221X_7-0.016X_8+0.067X_9-0.073X_{10}+0.092X_{11}+0.091X_{12}+0.101X_{13}+0.125X_{14}+0.139X_{15}+0.032X_{16}-0.002X_{17}+0.062X_{18}+0.048X_{19}+0.028X_{20}+0.054X_{21}+0.175X_{22}+0.071X_{23}+0.066X_{24}-0.146X_{25}-0.517X_{26}-0.019X_{27}+0.139X_{28}-0.073X_{29}-0.439X_{30}+0.227X_{31}+0.202X_{32}-0.249X_{33} \quad (2)$$

$$F=0.88836F_1+0.11164F_2 \quad (3)$$

式中, $X_1 \sim X_{32}$ 分别代表粗蛋白质、粗脂肪、膳食纤维、灰分、

褐藻胶、甘露醇、碘、苏氨酸、缬氨酸、蛋氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、苯丙氨酸、赖氨酸、色氨酸、天冬氨酸、丝氨酸、谷氨酸、甘氨酸、丙氨酸、酪氨酸、组氨酸、精氨酸、脯氨酸、胱氨酸、Mg、Mn、P、Fe、Ca、K、Na、水分。

新鲜嫩芽海带、热烫后的嫩芽海带和盐渍嫩芽海带营养成分主成分得分和综合得分见表 8, 综合得分分值越高, 表明综合品质越好。结果表明, 新鲜嫩芽海带得分最高, 营养品质最好, 其次为热烫后的嫩芽海带, 盐渍嫩芽海带最低, 虽然加工过程中嫩芽海带的综合营养品质有所下降, 但是盐渍是海带保鲜保质的重要加工方式, 不仅能延长海带的储存时间, 还在一定程度上保证了其形态及色泽。

表 8 嫩芽海带营养品质的主成分得分和综合得分
Table 8 Principal component scores and comprehensive scores of the nutritional quality of tender *Laminaria japonica*

嫩芽海带	主成分得分		综合得分 (F)	排名
	F ₁	F ₂		
新鲜嫩芽海带	5.43	1.10	4.94	1
热烫后的嫩芽海带	-0.02	-2.22	-0.27	2
盐渍嫩芽海带	-5.41	1.11	-4.68	3

3 结 论

通过分析嫩芽海带在加工过程中不同工序对其主要营养成分和矿物质的影响, 发现新鲜嫩芽海带、热烫后的嫩芽海带、盐渍嫩芽海带的营养成分和矿物质含量存在不同程度的差异, 盐渍加工过程会使嫩芽海带的营养成分发生不同程度的损失。氨基酸组成分析表明, 新鲜嫩芽海带的 EAA/TAA 和 EAA/NEAA 比值最大, 说明新鲜嫩芽海带的氨基酸组成更符合 FAO/WHO 推荐的理想蛋白质模式。重金属含量分析表明嫩芽海带中 Cd、总汞、无机砷和 Pb 的含量均远低于国内外规定的关于海带制品的重金属限量标准, 符合相关食品安全标准。主成分分析结果表明, 新鲜嫩芽海带得分最高, 营养品质最好, 其次为热烫后的嫩芽海带, 盐渍嫩芽海带最低, 经过一系列加工工序处理后嫩芽海带的综合营养品质下降。

综上所述, 盐渍加工过程虽然会使嫩芽海带的营养品质有所下降, 但是盐渍处理对于嫩芽海带的保鲜保质仍具有一定的重要意义。嫩芽海带与成熟海带相比具有独特的优势和特点, 嫩芽海带这一海洋经济产业刚刚兴起, 其开发应用前景广阔, 但目前相应的精深加工和开发利用方面的研究还未深入开展, 可以借鉴的相近研究领域是成熟海带的加工利用研究, 本研究分析了嫩芽海带在加工过程中不同工序对其主要营养成分和矿物质的影响, 有利于促进嫩芽海带产业进一步健康发展, 今后可通过对嫩芽海带的热烫和盐渍加工工艺进一步优化, 从而减少嫩芽海带的

营养成分在加工过程中的损失。

参考文献

- [1] DENG ZZ, WU N, WANG J, *et al.* Dietary fibers extracted from *Saccharina japonica* can improve metabolic syndrome and ameliorate gut microbiota dysbiosis induced by high fat diet [J]. *Journal of Functional Foods*, 2021, 85(4): 104642.
- [2] AKOMEA-FREMPONG S, PERRY JJ, SKONBERG DI. Effects of pre-freezing blanching procedures on the physicochemical properties and microbial quality of frozen sugar kelp [J]. *Journal of Applied Phycology*, 2022, 34(1): 609–624.
- [3] NI LY, WANG L, FU XT, *et al.* *In vitro* and *in vivo* anti-inflammatory activities of a fucose-rich fucoidan isolated from *Saccharina japonica* [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 156: 717–729.
- [4] CHEN H, WU Y, CHEN Y, *et al.* Seaweed *Laminaria japonica* peptides possess strong anti-liver cancer effects [J]. *Annals of Oncology*, 2021, S3(32): S189.
- [5] 李光辉, 钟世荣. 海带酸奶的制备原理与方法[J]. *食品科学*, 2002, 23(2): 80–82.
LI GH, ZHONG SR. Preparation principle and method of kelp yogurt [J]. *Food Science*, 2002, 23(2): 80–82.
- [6] 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 2023 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2023.
Fisheries Administration of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National aquatic Technology extension Station, China Fisheries Association. 2023 China fishery statistical yearbook [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2023.
- [7] PERRY JJ, BRODT A, SKONBERG DI. Influence of dry salting on quality attributes of farmed kelp (*Alaria esculenta*) during long-term refrigerated storage [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2019, 114: 108362.
- [8] DEL OA, PICON A, NUNEZ M. High pressure processing for the extension of *Laminaria ochroleuca* (kombu) shelf-life: A comparative study with seaweed salting and freezing [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2019, 52: 420–428.
- [9] 余翔, 苗修港, 张贝贝, 等. 热烫处理对南瓜叶化学成分及色泽的影响[J]. *食品科学*, 2016, 37(7): 44–49.
YU X, MIAO XG, ZHANG BB, *et al.* Effect of blanching on chemical composition and color of pumpkin leaves [J]. *Food Science*, 2016, 37(7): 44–49.
- [10] 姜雪. 海带营养品质评价及蒸煮加工对水溶性膳食纤维特性的影响[D]. 上海: 上海海洋大学, 2018.
JIANG X. Evaluation of the nutritional quality of kelp and effects of cooking technologies on the properties of soluble dietary fiber [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2018.
- [11] 李晓龙, 杨焱, 李文, 等. 不同烹饪方式对鹿茸菇营养特性和非挥发性风味物质的影响[J/OL]. *食品工业科技*, 1-14. [2024-07-04]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024020256>
LI XL, YANG Y, LI W, *et al.* Effects of different cooking methods on nutritional properties and non-volatile flavor substances of *Lyophyllum decastes* [J/OL]. *Science and Technology of Food Industry*, 1-14. [2024-07-04]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024020256>
- [12] 王雨馨, 郭莹莹, 李娜, 等. 加工方式对海带营养品质的影响[J]. *食品*

- 安全质量检测学报, 2020, 11(22): 8229–8234.
- WANG YX, GUO YY, LI N, *et al.* Effects of processing methods on the nutritional quality of kelp [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2020, 11(22): 8229–8234.
- [13] 侯丽. 海带加工副产物褐藻胶的综合利用[D]. 大连: 大连海洋大学, 2014.
- HOU L. The studies on the utilization of alginate which is by-produced from *Laminaria Japonica* [D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2014.
- [14] 李涛, 王飞久, 孙修涛, 等. 黄官 1 号海带在不同海域的营养成分分析与评价[J]. *食品科技*, 2012, 37(11): 70–75.
- LI T, WANG FJ, SUN XT, *et al.* Nutrition assessment on *Saccharina Huanguan* No.1 cultivated in different sea area [J]. *Food Science and Technology*, 2012, 37(11): 70–75.
- [15] 蒋鹏. 鲜海带漂烫过程中有效资源分布情况研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2014.
- JIANG P. Distribution of effective resources during the fresh kelp blanching [D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2014.
- [16] 陈伟珠, 晋文慧, 张怡评, 等. 离子色谱法测定海带中甘露醇的含量[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(3): 914–918.
- CHEN WZ, JIN WH, ZHANG YP, *et al.* Determination of mannitol in *Laminaria japonica* by ion chromatography [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2021, 12(3): 914–918.
- [17] 刘淇, 孙霞, 赵玲, 等. 鲜海带加工中甘露醇、碘及主要金属元素含量变化[J]. *海洋渔业*, 2014, 36(1): 73–77.
- LIU Q, SUN X, ZHAO L, *et al.* The content changes of mannitol, iodine and main metal elements in the fresh *Laminaria japonica* processing [J]. *Marine Fisheries*, 2014, 36(1): 73–77.
- [18] 中国营养学会. 中国居民膳食指南(2022)版[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2022.
- Chinese Nutrition Society. *Dietary guidelines for Chinese residents (2022)* [M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2022.
- [19] FAO WHO Ad Hoc Committee. Energy and protein requirement [R]. Geneva: FAO Nutrition Meetings Report Series, 1973.
- [20] 倪辉, 王晓林, 姜泽东, 等. 海带生长初期与成体期食品原料学特性[J]. *食品科学*, 2022, 43(23): 34–40.
- NI H, WANG XL, JIANG ZD, *et al.* Study on the characteristics of food raw materials of kelp in the early growth stage and adult stage [J]. *Food Science*, 2022, 43(23): 34–40.
- [21] 姚海芹, 王飞久, 刘福利, 等. 食用海带品系营养成分分析与评价[J]. *食品科学*, 2016, 37(12): 95–98.
- YAO HQ, WANG FJ, LIU FL, *et al.* Chemical analysis and nutritional assessment of new varieties of *Saccharina japonica* [J]. *Food Science*, 2016, 37(12): 95–98.
- [22] YAN P, HU J, YANG B. Chapter 5-chemical composition of seaweeds [M]. *Seaweed Sustainability: Food and Non-Food Applications*. San Diego: Academic Press, 2015.
- [23] 李保兴. 人体钠钾平衡刍议[J]. *生物学教学*, 2007, 32(7): 73–74.
- LI BX. On the balance of sodium and potassium in human body [J]. *Biology Teaching*, 2007, 32(7): 73–74.
- [24] RUEZ P. Mineral content of edible marine seaweeds [J]. *Food Chemistry*, 2002, 79(1): 23–26.
- [25] MICHOS ED, CAINZOS-ACHIRICA M, HERAVI AS, *et al.* Vitamin D, calcium supplements, and implications for cardiovascular health: JACC focus seminar [J]. *Journal of the American College of Cardiology*, 2021, 77(4): 437–449.
- [26] 姜雪, 刘楠, 孙永, 等. 荣成鲜海带及其干、盐制品的营养成分分析[J]. *食品安全质量检测学报*, 2018, 9(8): 1874–1880.
- JIANG X, LIU N, SUN Y, *et al.* Analysis of nutritional components of Rongcheng fresh kelp and its dry and salt products [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2018, 9(8): 1874–1880.
- [27] 何清, 胡晓波, 周峙苗, 等. 东海绿藻缘管浒苔营养成分分析及评价[J]. *海洋科学*, 2006, 30(1): 34–38.
- HE Q, HU XB, ZHOU SM, *et al.* Evaluation on nutrition components of *Enteromorpha linza* [J]. *Marine Sciences*, 2006, 30(1): 34–38.
- [28] 李红艳, 李晓, 王颖, 等. 三种大型褐藻营养成分分析与评价[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(19): 222–227.
- LI HY, LI X, WANG Y, *et al.* Analysis and evaluation of nutritional composition of three large brown algae [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(19): 222–227.
- [29] 沈鲁滨, 武桂芝, 张成, 等. 浓海水吸收 CO₂ 分步沉淀钙镁离子及响应面优化[J/OL]. *工业水处理*, 1-22. [2024-11-05]. <https://doi.org/10.19965/j.cnki.iwt.2024-0130>
- SHEN LB, WU GZ, ZHANG C, *et al.* Stepwise precipitation of calcium and magnesium ions by CO₂ absorption in concentrated seawater and response surface optimization [J/OL]. *Industrial Water Treatment*, 1-22. [2024-11-05]. <https://doi.org/10.19965/j.cnki.iwt.2024-0130>
- [30] 姜雪, 刘楠, 孙永, 等. 基于主成分分析的鲜海带营养品质评价[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(19): 220–224.
- JIANG X, LIU N, SUN Y, *et al.* Nutritional quality evaluation of fresh kelp based on principal component analysis [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(19): 220–224.
- [31] 葛庆联, 刘茵茵, 樊艳凤, 等. 基于相关性分析和主成分分析的宁都黄鸡肉品质评价研究[J]. *食品安全质量检测学报*, 2024, 15(10): 49–55.
- GE QL, LIU YY, FAN YF, *et al.* Study on meat quality evaluation of Ningdu yellow chicken based on correlation and principal component analysis [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2024, 15(10): 49–55.
- [32] 刘宇鹏, 陈芳, 古书鸿, 等. 贵州不同产地冬菇营养成分分析及品质评价[J]. *中国农业科技导报*, 2023, 25(11): 143–153.
- LIU YP, CHEN F, GU SH, *et al.* Analysis of nutritional compositions and evaluation of quality on *Phallus impudicus* L. from different producing areas in Guizhou [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2023, 25(11): 143–153.

(责任编辑: 于梦娇 蔡世佳)